

А. М. БОНДАРЕВ (ДИИТ)

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЕСА ПОЕЗДА НА ДИНАМИЧЕСКУЮ НАГРУЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В ЦЕПЯХ ПИТАНИЯ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК**

В статье приведены результаты теоретических расчетов аварийных режимов коротких замыканий в цепях питания статорных обмоток асинхронных тяговых двигателей при троганиях с места локомотива с составом грузового поезда

У статті наведено результати теоретичних розрахунків режимів коротких замикань у колах живлення статорних обмоток асинхронних тягових двигунів при зрушеннях з місця локомотива зі складом вантажного поїзда.

The article provides the results of theoretical calculations of short circuit emergency operation modes in supply circuits of the stator windings of asynchronous tractive motors at start-up of the locomotive, hauling a freight train.

Хорошие тягово-энергетические показатели и надежная работа локомотива в значительной мере определяются соответствующими показателями и характеристиками тягового привода. Наиболее надежным и экономичным в эксплуатации, а также наименее материалоемким среди тяговых двигателей является асинхронный тяговый двигатель (АТД). Отметим, что на всех новых локомотивах, предназначенных для магистральных железных дорог в разных государствах мира, устанавливаются асинхронные тяговые двигатели. Преимущества АТД в сравнении с коллекторными тяговыми двигателями отмечается в ряде работ [1; 2]. Вместе с этим следует иметь в виду, что при разработке тяговых приводов с использованием АТД необходимо учитывать и особые ситуации, которые являются нештатными – это аварийные режимы трех- или двухфазных коротких замыканий в цепях питания статорных обмоток.

Аналізу динамічної навантаженості елементів тягового привода при коротких замиканнях в цепях живлення статорних обмоток присвячені роботи [1–4]. В цих роботах аналізувалась навантаженість при двух- і трехфазних коротких замиканнях, оцінювалось вплив стану фаз живлячих обмоток перед моментом короткого замикання на рівень динамічної навантаженості. Розглядалися також різні види тягових приводів (груповий, приводи першого і другого класу) [2]. Розглядалась задача про навантаженість тягового привода при троганні локомотива з складом поїзда [2]. Однак ця задача вирішувалась в упрощеній постановці і не враховува-

лись при перехідних режимах руху коливання рам тележок і кузова локомотива.

В даній роботі аналізується динамічна навантаженість елементів асинхронного тягового привода в аварійних режимах трехфазних коротких замикань при троганні грузопассажирського електровоза з складом вагонів грузового поїзда вагою 3400 т. Такий вага, з економічної точки зору, на деяких дорогах виявляється найбільш раціональним.

Численні розрахунки проводились на основі розробленої розрахункової схеми, математичної моделі і програми, що дозволяють моделювати перехідні режими руху при троганні з місця з складом вагонів грузового поїзда односекційного чотирьохосного електровоза з асинхронними тяговими двигателями.

При цьому було виділено:

а) в механічній частині з використанням симетрії системи – кузов; рама тележки; два статора і ротора АТД; два торсіонних вала; чотири зубчасті муфти; два корпуси тягових редукторів і дві шестерні; дві колесні пари, розділені на дві частини; склад вагонів грузового поїзда, які об'єднуються в одну масу по мірі вибору зазорів в міжвагонних з'єднаннях при троганні локомотива з місця.

б) в електричній частині – два АТД.

В розробленій математичній моделі, описуючій положення кожного елемента механічної частини, розглядаються: крутильні коливання; продольні коливання; коливання підпрыгивання і галопування, совер-

шаемые в продольной плоскости симметрии. В электрической части привода процессы описываются так, как это принято в асинхронных электрических машинах, имеющих три пары полюсов и по три статорных и роторных обмоток. Роторы АД выполнены в виде беличьих клеток. При определении токов и потокоцеплений рассматривалась система координат  $\alpha, \beta, \gamma$  – неподвижных относительно обмоток статора [1–4]. В такой системе координат не возникает необходимость на каждом шаге интегрирования обращать матрицу параметров схемы замещения и связи между токами и потокоцеплениями. Электромагнитные моменты тяговых двигателей  $T_{emi}$  в такой модели являются функциями параметров схемы замещения [1–4]  $L_{mi}, L_{ri}, L_{si}, R_{ri}, R_{si}$ , а также токов статорных и роторных обмоток  $I_{si}, I_{ri}$ . Статорные обмотки АД запитываются от автономных инверторов напряжений (АИН). Формируемые системами управления (преобразователями частоты) фазные напряжения питания статорных обмоток  $u_i$  представляют собой последовательность импульсов с переменными амплитудой, частотой и полярностью. При скоростях движения  $0 < v < 62$  км/ч применяют широтно–импульсную модуляцию.

Для такой электромеханической системы, на основании известных соотношений механики и электромеханики, была разработана математическая модель, состоящая из 54 дифференциальных уравнений и соответствующих уравнений определения перемещений, скоростей и усилий в соединениях тел механической части, а также токов, потокоцеплений и электромагнитных моментов в электрической части.

Расчеты процессов, возникающих в электромеханической системе, проводились следующим образом. При нулевых начальных условиях рассматриваемой системы дифференциальных уравнений в математическую модель электрической части начинают задаваться фазные напряжения  $u_i$ . Эти напряжения являются функциями, у которых изменяются частота и амплитуда. В расчетах принималось, что интенсивность разгона локомотива и поезда можно регулировать изменением частоты, и таким образом предопределять нарастание амплитуды напряжений питания и значений скольжения. Также было принято, что частота напряжений питания статорных обмоток изменялась по экспоненциальному закону  $f = f_{\max} (1 - \exp(-\gamma t))$ . Расчеты показали, что

существенного снижения вибраций тягового двигателя и других элементов механической части при троганиях локомотива с места с составом вагонов поезда с места можно добиться, если системы управления обеспечивают его разгон при значениях  $\gamma \geq 3$ . В связи с этим расчеты проводились при значениях  $\gamma = 3$ . Спустя некоторое время после начала интегрирования системы дифференциальных уравнений фазные напряжения полагались равными нулю, что эквивалентно короткому замыканию (при этом фиксировалось число вагонов состава поезда, которые пришли в движение). В расчетах параметры электрической и механической частей принимались такими же, как это было принято в работе [4] и соответствовали параметрам электровоза ДСЗ. В табл. приведены результаты расчетов аварийных трехфазных коротких замыканий, возникающих после трогания электровоза с составом вагонов грузового поезда через 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 и 22,0 с. При этом в движение включалось 4, 9, 15, 20, 40 груженых вагонов, что соответствовало весу поезда 340, 765, 1275, 1700 и 3400 т.

Таблица

**Значения ускорений, моментов и усилий в элементах тягового привода**

Величина	Время кз, с				
	0,5	1,0	1,5	2,0	22,0
$\dot{\omega}_{\text{фк}}, \text{с}^{-2}$	1,6	1,7	2,0	2,1	5,1
	–0,6	–1,7	–1,3	–1,2	–0,8
	2,0	0,4	1,3	1,4	4,9
$\ddot{v}_{\text{ядел}}, \text{М/с}^2$	10,0	16,6	16,0	20,5	29,6
	–2	–3,8	6,0	13,5	8,9
	11,0	5,3	4,6	3,0	5,0
$\dot{\omega}_{\text{фдел}}, \text{с}^{-2}$	–8	8,8	–8,9	10,8	8,9
	10,0	–2,8	–4,0	–7,7	2,2
	3,0	6,4	3,7	2,0	6,5
$\dot{\omega}_{\text{пред}}, \text{с}^{-2}$	14,0	18,8	20,9	20,0	36,3
	–12,0	–7,9	–9,2	–6,0	15,5
	2,5	3,6	3,3	5,0	5,0
$T_{em1}, \text{кНм}$	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
	9,2	10,0	7,7	7,4	13,0
	3,4	3,2	4,3	4,0	3,2
$T_{m11}, \text{кНм}$	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
	10,0	9,3	8,5	7,7	13,0
	3,3	3,9	4,5	4,3	3,2
$F_{нТ}, \text{кН}$	10,4	80,8	92,3	103,8	144,0
	7,0	80,8	80,8	34,6	–22,2
	11,4	0,7	0,3	2,2	2,5
$F_{зп11}, \text{кН}$	126,9	111,0	115,0	114,0	110,0
	103,8	80,8	57,7	76,9	110,0
	1,7	1,3	0,8	1,6	1,4

В данной табл. в первом столбце приведены обозначения вычисляемых в результате интегрирования системы дифференциальных уравнений: ускорений ( $\dot{\omega}_{\text{фк}}$  – галопирования кузова;  $\dot{\omega}_{\text{Zob1}}$  – подпрыгивания двигателя;  $\dot{\omega}_{\text{фоб1}}$ ,  $\dot{\omega}_{\text{фред1}}$  – вращательных колебаний относительно горизонтальной поперечной оси двигателя и редуктора); электромагнитного момента  $T_{\text{ем1}}$  и момента  $T_{\text{м11}}$  в зубчатой муфте, соединяющей ротор и торсионный вал; усилий в наклонной тяге  $F_{\text{нТ}}$  и в зубчатой передаче  $F_{\text{зм11}}$ . В остальных столбцах в первой строке указаны наибольшие значения соответствующих величин, во второй строке – значения соответствующих величин перед моментом короткого замыкания и в третьей строке – значения коэффициентов динамичности. Коэффициенты динамичности определялись как отношения значений величин после короткого замыкания к соответствующим значениям, предшествующим короткому замыканию.

Анализ полученных результатов показал, что значения коэффициентов динамичности для электромагнитного момента  $T_{\text{ем1}}$  и момента в зубчатой муфте  $T_{\text{м11}}$  оказались примерно на 25 % выше тех величин, которые были получены при проведении аналогичных расчетов в предположении, что на соответствующей скорости режим движения установившийся. В остальных элементах значения коэффициентов динамичности в значительной мере зависят от

состояния системы перед короткими замыканиями. Таким образом, при оценке динамической нагруженности элементов тягового привода локомотива необходимо учитывать переходные режимы движения и моделировать аварийные режимы коротких замыканий на малых скоростях при его троганиях с места с составом поезда.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурков А. Г. Анализ режимов автономных инверторов напряжений локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями методом цифрового динамического моделирования. Полупроводниковая техника в устройствах электрических железных дорог. – Л.: ЛИИЖТ, 1978. – С. 11–54.
2. Манашкин Л. А., Бондарев А. М., Грановская Н. И. и др. Исследование динамической нагруженности асинхронных тяговых приводов локомотивов при трогании поезда с места // Динамика и прочность железнодорожных экипажей: Межвуз. сб. научн. тр. – Д., 1999. – С. 71–79.
3. Манашкин Л. А., Бондарев А. М., Грановская Н. И. Расчет динамических нагрузок в асинхронном тяговом приводе при коротком замыкании обмоток статора // Вестник ВНИИЖТ. – 1988. – С. 21–25.
4. Бондарев О. М. Вільні коливання при передачі обертового моменту в асинхронному тяговому приводі електровоза // Залізничний транспорт України. – 2002. – № 6. – С. 34–38.

Поступила в редколлегию 20.10.03.